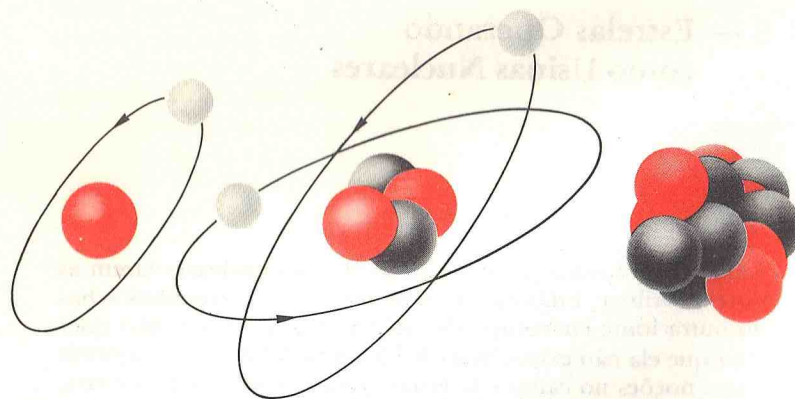


### 3 — Estrelas Operando como Usinas Nucleares

Ainda não sabemos ao certo se as reações nucleares fazem as estrelas brilhar. Embora, até o momento, não tenhamos achado outra fonte energética, de rendimento igual, isto não quer dizer que ela não exista. Sempre há a possibilidade de surgirem novas noções no campo da Física, aptas a revelar meios e vias, até agora desconhecidos, de produção energética, novas fontes de energia, a exemplo daquelas que a ficção científica já está antecipando. No capítulo anterior vimos como algumas propriedades de aglomerados estelares combinam perfeitamente com a idéia da geração de energia nuclear no interior de uma estrela e, a seguir, veremos como esta idéia é acertada. Nem é preciso procurar fontes energéticas novas, desconhecidas. Enfim, hoje em dia, cabe ao físico nuclear explicar ao astrônomo, em detalhes, por que as estrelas brilham, não obstante, em inícios dos anos 20, o físico ainda se tenha recusado terminantemente a acreditar em reações nucleares nas estrelas! Isto tinha a ver com a estrutura do átomo.

#### As Partículas Elementares do Átomo

Em última análise, todas as matérias neste nosso mundo — as pedras, os minerais, os elementos do ar e dos mares, as células vegetais e animais, bem como as nebulosas gasosas no universo, em toda a sua imensa multiplicidade — são compostas de somente 92 partículas elementares, os *elementos químicos*. Esta noção, datando do século passado, modificou e muito a imagem do mundo. Coube ao nosso século XX demonstrar como estes 92 elementos químicos, a rigor, se compõem de somente três tipos de partículas elementares, que são os *prótons*, os *nêutrons* e os *elétrons*. Por exemplo, os átomos do elemento hélio distinguem-se dos do elemento carbono apenas por suas diversas estruturas de construção, coordenando as três partículas elementares em número diverso, uma ao lado da outra (fig. 3-1).



<b>Hidrogênio</b>	<b>Hélio</b>	<b>Carbono</b>
<b>Número de massa 1</b>	<b>Número de massa 4</b>	<b>Número de massa 12</b>
<b>Número atômico 1</b>	<b>Número atômico 2</b>	<b>Número atômico 6</b>

Fig. 3-1. Esquema dos átomos de hidrogênio, hélio e carbono. Os prótons são vermelhos, os nêutrons, de cor cinzenta. O desenho das órbitas dos elétrons (cor cinzenta-clara) em volta dos núcleos não obedece a escala. No carbono foram omitidos os 6 elétrons em órbita do núcleo.

Um átomo de hélio é composto de um núcleo contendo dois prótons e dois nêutrons. O próton tem carga elétrica positiva e, por conseguinte, o núcleo do átomo do hélio é positivo. Ao seu redor movimentam-se duas partículas com carga negativa, dois elétrons, formando o *invólucro eletrônico* do átomo de hélio. A estrutura de construção do elemento carbono é mais complexa. Ele é constituído igualmente de um núcleo contendo prótons e nêutrons, cada um em número de 6 e, ao redor do núcleo, há 6 elétrons em órbita. O átomo mais simples é o de hidrogênio; seu núcleo é de um próton, com um elétron em órbita.

O próton e o nêutron têm aproximadamente a mesma massa; são chamados partículas pesadas, apesar de nada pesarem, em comparação com aquilo que costumamos pesar. Se fosse possível colocar sobre o prato de uma balança 1 bilhão dessas partículas pesadas, seu peso atingiria 1 bilionésimo de um grama. O elétron possui somente 2 milésimos da massa do próton. O próton é positivo e o elétron é negativo, de modo que, em conjunto, o próton e o elétron são eletricamente neutros. O nêutron não tem carga elétrica. Por vezes, uma partícula da massa do elétron é positiva e temos, então, o pósitron, cuja

vida sempre é efêmera, pois, tão logo se aproxime do elétron com ele se reúne. O elétron e o pósitron se fundem e emitem uma pequena fagulha de luz.

Todos os núcleos atômicos são constituídos de um determinado número de prótons e nêutrons. O número de prótons armazenados no núcleo corresponde ao dos elétrons, normalmente orbitais, de modo que a carga elétrica positiva dos prótons, no núcleo, é anulada pelos elétrons negativos, que formam o seu invólucro. Aliás, as coisas são ainda mais simples. A rigor, a matéria do mundo não se compõe de três tipos de partículas elementares, ou seja, prótons, nêutrons e elétrons, mas sim, de apenas duas, pois no núcleo do átomo os prótons e elétrons entram em fusão, formando os nêutrons. Quando um nêutron é retirado do núcleo atômico, leva uns 17 minutos para desintegrar-se em um próton e um elétron. Assim sendo, é lícito concluir que o mundo, em toda a sua imensa variedade, é composto tão somente de prótons e elétrons. O número dos prótons mais o número dos nêutrons, no núcleo atômico, representam o *número de massa* do núcleo; o número dos seus prótons é chamado de *número da carga nuclear = número atômico*. Por conseguinte, o átomo de hidrogênio tem o número de massa 1 e o número atômico 1. Para o hélio, o número de massa é 4 e o número atômico é 2. A espécie mais comum dos átomos de ferro tem o número de massa 56 e o número atômico 26. O número atômico indica também o número dos elétrons, que orbitam em torno do núcleo para deixar o átomo neutro. O invólucro eletrônico determina as propriedades químicas das substâncias. Logo, substâncias de números atômicos diversos são quimicamente diversas, pois os seus invólucros eletrônicos são diferentes. Átomos de números atômicos iguais, mas com números diversos de nêutrons, são quimicamente iguais, distinguindo-se apenas pelo número de massa; eles são chamados *isótopos* de um só elemento. Ao lado do hidrogênio comum, temos o isótopo de hidrogênio do hidrogênio pesado, cujo núcleo encerra ainda um nêutron além do próton. Este isótopo estável de hidrogênio é chamado de deutério, do qual existem poucos vestígios na Natureza.

Não obstante a diferença de peso entre um pedaço de ferro e o gás de hidrogênio, ambos são aglomerados de prótons e elétrons. Se fosse possível tomar 56 átomos de hidrogênio e fazer um arranjo qualquer com seus 56 prótons e 56 elétrons, como retirar deles 30 elétrons e um número igual de prótons, para transformá-los em nêutrons, para, em seguida, reunir em um núcleo atômico esses nêutrons com os restantes 26 prótons e fazer orbitar os restantes 26 elétrons ao redor do núcleo, um

átomo de hidrogênio teria sido transformado em um átomo de ferro.

Tomando-se 4 átomos de hidrogênio e fazendo-se dois nêutrons de 2 elétrons e 2 prótons e reunindo-os com os restantes prótons em um núcleo atômico, obtém-se um núcleo atômico de número de massa 4 e número atômico 2, com os dois elétrons restantes em sua órbita. Destarte, o hidrogênio teria sido transformado em hélio. Este processo libera energia. No entanto, não é tão fácil assim fazer os núcleos atômicos entrarem em fusão e se transformarem.

### Arthur Eddington e a Fonte Energética das Estrelas

Sir Arthur Eddington era o titular de uma famosa cátedra de Astronomia da Universidade de Cambridge, a "*Plumian Professorship*". Em 1926, ele publicou o seu livro *The Internal Constitution of the Stars* ("A Constituição Interna das Estrelas"), uma brilhante exposição das noções contemporâneas da Física e do interior das estrelas, para as quais o próprio Eddington contribuiu substancialmente. Já naquela época, sabia-se como uma estrela funciona em princípio; porém ainda faltava a chave principal para a decifração do enigma, a noção da geração de energia.

Já não havia mais dúvida a respeito de, com sua riqueza de hidrogênio, a matéria estelar poder ser um gerador ideal de energia. Já se sabia que a transformação do hidrogênio em hélio liberava quantidades de energia suficientes para garantir a irradiação do Sol e das estrelas, por bilhões de anos. Assim sendo, não se teve dúvida de haver sido encontrada uma formidável fonte energética, se e quando fossem conhecidas as condições sob as quais se opera a fusão do hidrogênio. Porém, naquele tempo, ainda estávamos longe, bem longe de fazer experiências com a transformação do hidrogênio em hélio.

Destarte, os astrofísicos da época não tinham alternativa se não acreditar, apesar de tudo, que as estrelas eram gigantescas usinas atômicas, visto não se poder imaginar outro processo apto para gerar energia suficiente para garantir a irradiação do Sol, por bilhões de anos. Para tanto, Eddington encontrou a formulação mais conseqüente; referindo-se às numerosas e repetidas medições da claridade das estrelas, efetuadas por astrônomos-observadores, ele escreveu: "As medições da liberação de energia nuclear estão entre as mais freqüentes observações astronômicas e, a não ser que o meu livro esteja totalmen-

te errado, então, já dispomos de boas noções da densidade e temperatura da matéria, condições primordiais para que esses processos possam desenvolver-se." — Infelizmente, outrora, os físicos nem pensavam que, nas estrelas, os núcleos atômicos pudessem reagir um ao outro.

Naquela época, Eddington já pôde avaliar as temperaturas existentes no interior do Sol. O Sol fica coeso por força da gravidade da massa nele contida. A gravidade atrai a matéria para o centro, com o gás solar exercendo contrapressão, fazendo com que a matéria solar não caia simplesmente sobre o centro do Sol. A força de compressão está tentando empurrar para fora a matéria e, assim sendo, age contra a gravidade. Ambas as forças estão se equilibrando. Condições idênticas conhecemos da atmosfera terrestre. Se não houvesse a gravidade, a força da sua compressão faria o ar sair pelo espaço. Outrossim, se não houvesse a pressão atmosférica, o invólucro de ar precipitar-se-ia sobre a Terra. No caso do Sol, é possível calcular a gravidade com a qual a matéria solar se auto-atrai; da mesma ordem deve ser a pressão do gás, equilibrando a gravidade. A pressão de um gás depende da sua densidade e temperatura. A densidade da matéria solar pode ser calculada, pois são conhecidos tanto o volume da massa solar quanto a área ocupada pelo Sol. De que ordem é a pressão da matéria solar? Depende da temperatura. Quanto mais quente o gás, tanto mais forte a sua pressão. Qual o grau de calor a ser atingido pelo gás no interior do Sol, para que possa equilibrar a gravidade?

Eddington avaliou em 40 milhões de graus centígrados a temperatura na região central do Sol. A nós, esta avaliação parece muito por alto, no entanto, para o físico nuclear, ela seria até uma temperatura baixa demais para promover reações nucleares. Com essa temperatura, os átomos no interior do Sol movem-se, um em direção do outro, com velocidade de 1.000 km p/s. Nesta altura, os átomos de hidrogênio já perderam, desde há muito, seus elétrons e seus prótons voam, livremente, pelo espaço. Vez ou outra, dois colidem; mas, como ambos são positivos, eles se repelem mutuamente. Desenvolvendo velocidade de 1.000 km p/s eles passam bem próximos um do outro, mas são desviados por suas forças elétricas, repelentes, antes de poderem aproximar-se o suficiente para entrarem em fusão. Ademais, para fazer do átomo de hidrogênio um núcleo de hélio, 4 prótons e 2 elétrons, ou seja, 6 partículas ao todo, deveriam reunir-se em um dado ponto — acontecimento altamente improvável. E mesmo que, por acaso, as 6 partículas fossem ao seu encontro, as forças elétricas desviariam os seus trajetos e, assim, impediriam que entrassem em

fusão. Somente com temperaturas de mais de 10 bilhões de graus centígrados, as partículas ficariam aceleradas a ponto de poderem entrar em fusão, apesar das forças elétricas repelentes. Na época, os físicos reputavam como frio demais o interior do Sol, com seus 40 milhões de graus, para a transformação do hidrogênio em hélio. No entanto, mesmo assim, Eddington tinha a firme convicção de que a energia nuclear alimentava as estrelas e, em tom de desafio, escreveu: "Não brigamos com o crítico que alega que as estrelas não seriam suficientemente quentes para tal processo, mas sim, a ele falamos que vá buscar um lugar mais quente!". De fato, Eddington ainda não considerou suficientemente garantidas as previsões dos físicos, a respeito das condições sob as quais o hélio pode ser gerado do hidrogênio. Ele preferiu contar com as suas estrelas e achou que ainda viria o dia, quando os físicos chegassem a saber como o hidrogênio pode ser transformado em hélio, à temperatura de 40 milhões de graus centígrados.

#### George Gamov e o seu "Efeito de Túnel"

Mais ou menos na época em que Eddington teimava em seu livro de que, no interior das estrelas, o hidrogênio é transformado em hélio, tinha início a grande reviravolta, a nova alvorada na Física, inaugurada por Louis de Broglie, em Paris, Niels Bohr, em Copenhague, Erwin Schroedinger, em Zurique e os catedráticos da Universidade de Göttingen, na Alemanha. Ali floresceu a grande Escola da Mecânica dos Quanta, de Max Born; eram os dourados anos 20 de Göttingen. De todas as partes do mundo, muitos jovens físicos acorreram para lá, tornaram-se famosos em décadas posteriores e dentre eles havia futuras celebridades da categoria de Werner Heisenberg, Robert Oppenheimer, Paul Dirac e Edward Teller. Um deles era o jovem russo George Gamov, que tratou do problema da radioatividade, ou seja, da desintegração natural do átomo.

Há elementos químicos que se autodesintegram. O urânio desintegra-se formando o tório, o tório, formando o rádio que, por sua vez, continua se desintegrando. O núcleo de rádio, de tipo mais comum, é de 88 prótons e 138 nêutrons. Depois de certo tempo, um núcleo de rádio elimina, por si só, dois nêutrons e dois prótons e se transforma em um núcleo atômico com massa menor. As partículas eliminadas continuam entreligadas, formando um núcleo de hélio. Foi difícil compreender, como o núcleo do rádio pode eliminar um núcleo de hélio.

As partículas elementares do núcleo de rádio estão comprimidas, densamente, em um espaço minúsculo e ficam coesas por forças de alta potência, as forças nucleares, muito mais potentes do que a repulsão elétrica dos prótons. Sem as forças nucleares, o núcleo de rádio dispersar-se-ia, impulsionado pelos prótons, que dele se separam. Todavia, o raio de ação das forças nucleares é limitado. Quando uma partícula do núcleo se afasta demais, a repulsão elétrica prevalece e as duas partículas se dispersam. Segundo os ditames da Física Clássica, isto jamais deveria acontecer, porque as forças nucleares mantêm o núcleo coeso. No entanto, na Natureza isto acontece.

Gamov equacionou o problema da desintegração do átomo. Está certo que as partículas componentes de um núcleo de rádio são mantidas coesas pelas forças nucleares e, a rigor, nem se podem afastar muito, umas das outras. No entanto, a moderna Mecânica dos Quanta ensina que isto somente pode ser esperado com certa probabilidade. Mesmo que não possa acontecer, segundo a Mecânica Clássica, por vezes e não obstante as potentes forças coesivas, algumas partículas do núcleo logram afastar-se do resto a uma distância suficiente para que a repulsão elétrica prevaleça e continue dispersando os dois produtos da desintegração. O processo é improvável, mas, mesmo assim, não deixa de acontecer. Tratando-se de átomos de rádio, é preciso esperar por mais de 1.000 anos para um núcleo de hélio ser expulso.

Este fenômeno é chamado de "efeito de túnel", que chegou a ser compreendido somente por meio da Mecânica dos Quanta. As partículas elementares do núcleo de rádio ficam presas pelas forças nucleares, como se fossem isoladas do exterior por uma muralha circular. Sua energia não dá para passar por essa muralha e chegar ao mundo de fora. Segundo a Mecânica Clássica, para elas, a muralha é intransponível. Segundo a Mecânica dos Quanta, vez ou outra, pode acontecer que uma partícula elementar consiga alcançar o lado externo da muralha; em vez de escalar a muralha, por ela teria passado através de um túnel, aberto no seu fundo.

#### O Efeito de Túnel nas Estrelas

Voltemos para as estrelas e para a pergunta da origem de sua energia, levantada nos anos 20. Suposto que núcleos de rádio façam aquilo que, a rigor, não deveriam fazer, por que os prótons, no interior do Sol, deixariam de fazer o que os físicos não

querem que façam? No caso do rádio, as forças nucleares deveriam impedir o afastamento demasiado de um próton do outro, protegendo-os dos efeitos da repulsão elétrica. No entanto, o núcleo do rádio chega a desintegrar-se, mesmo que isto seja proibido. Logo, por que no Sol os prótons deixariam de entrar em fusão, apesar de tal união ser proibida?

Os físicos Robert Atkinson e Fritz Houtermans lograram decifrar o enigma da geração de energia nas estrelas, mediante o Efeito de Túnel, descoberto por Gamov. Em março de 1929, publicaram uma matéria na "Zeitschrift fuer Physik" ("Revista de Física"), intitulada: "A respeito da pergunta sobre a possibilidade da constituição dos elementos nas estrelas", cujas palavras iniciais são as seguintes: "Há pouco tempo, Gamov demonstrou como partículas positivas podem penetrar no núcleo atômico, mesmo quando, para tanto, a sua energia seja insuficiente, segundo os conceitos clássicos..." Os autores explicaram como, segundo os ditames da Física Clássica, os átomos de hidrogênio somente podem entrar em fusão com temperaturas de alguns 10 bilhões de graus centígrados, quando, em comparação, as temperaturas relativamente moderadas no interior das estrelas de fato permitem a sua aproximação, bem de perto. Apesar de, na estrela, um próton ficar separado do outro pelos campos magnéticos, que constituem obstáculos graves, quase intransponíveis, eles conseguem vencê-los — quiçá somente ao cabo de um período prolongado — mesmo com a sua energia insuficiente para tal façanha; até parece que passaram por um túnel, para chegar ao outro lado do obstáculo. Embora com pequena probabilidade, o Efeito de Túnel acontece de fato no interior do Sol e de outros astros com bastante frequência, a ponto de as estrelas poderem tirar a sua subsistência da energia liberada no processo. Atkinson e Houtermans lograram provar aquilo que Eddington apenas presumiu: o consumo energético do Sol e das estrelas é suprido pela transformação do hidrogênio em hélio.

Com este seu trabalho, esses dois físicos criaram a base para a teoria das reações termonucleares, a teoria dos processos que, em última análise, provocam a geração de energia no interior dos astros. A fonte energética do Sol e das estrelas foi encontrada.

Quando Robert Jungk coletou material para o seu livro "Mais Claro Que Mil Sóis", Houtermans lhe falou daquela época: "Certa noite, depois de terminado o nosso trabalho, fui passear com uma moça bonita. O dia escureceu e as estrelas surgiram no céu. — Como brilham, bonitas! — exclamou a moça. Eu, todo cheio de orgulho, falei: — Desde ontem, sei

por que brilham! — Ela não se impressionou com aquelas minhas palavras. Será que nelas acreditou? Provavelmente, naquele instante ela pouco se importou com aquilo." Eis a estória, conforme contada no livro de Jungk.

Quando, em 1965, fui convidado pela Universidade de Göttingen para lá ocupar uma cátedra, tive a intenção de procurar aquela moça bonita; mas, ficou nisto. Sete anos mais tarde, encontrei-me com ela em Atenas, por ocasião de um congresso. O casal Atkinson, entremetidos radicado nos EUA, em Bloomington, Indiana, também compareceu e a sra. Atkinson, uma berlinense temperamental, confirmou que, de fato, ela soube do episódio pelo próprio Houtermans, no entanto, as coisas se passaram de maneira bem menos romântica que a descrita no livro de Jungk. Naquela ocasião, cheguei a saber ainda de um outro detalhe, bem mais importante. Perguntei ao sr. Atkinson como eles conseguiram realizar aquele trabalho. Ele contou que leu o livro de Eddington e assim inteirou-se do dilema oferecido pela geração energética das estrelas, devido ao fato de, no interior dos astros, as temperaturas serem insuficientes para a fusão dos núcleos; aliás, Eddington tinha a firme convicção de que somente a energia nuclear podia fazer as estrelas brilharem. Ele, Atkinson, falou do assunto com Houtermans. Naquela altura, o tempo era propício para a equação do problema. Gamov acabara de publicar a sua matéria e assim estabeleceu as condições necessárias para a solução do problema, então encontrada por Atkinson e Houtermans.

Desde então, sabe-se da possibilidade de poderem processar-se reações nucleares no interior das estrelas. Mas, de que tipo seriam essas reações nucleares? Será que os prótons se fundem com prótons, ou será que os prótons penetram em outros núcleos atômicos? E, em caso afirmativo, quais seriam esses núcleos atômicos? A resposta veio somente dez anos mais tarde.

### O Ciclo do Carbono

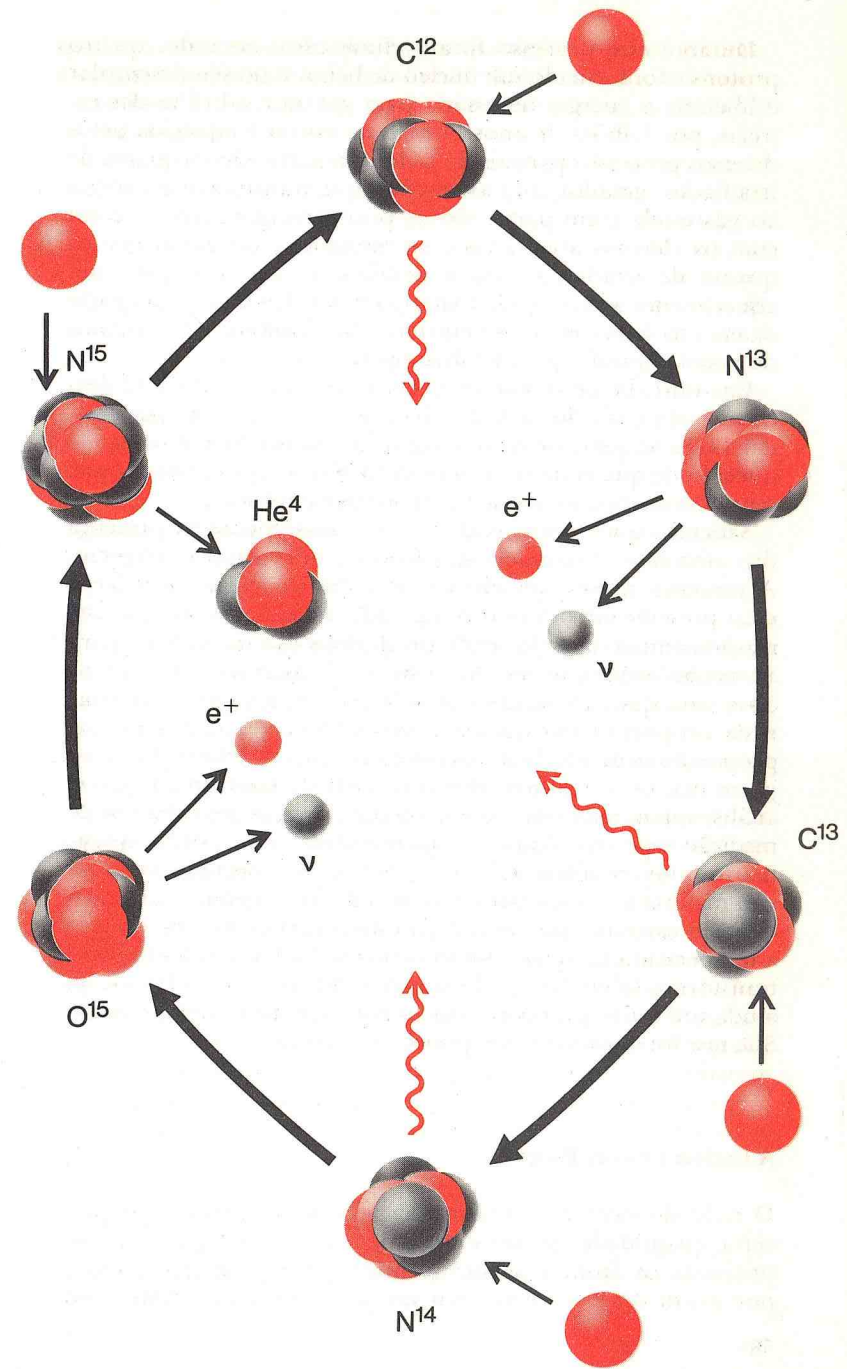
De que maneira o hidrogênio se transforma em hélio no interior das estrelas? Esta pergunta teve sua primeira resposta dada por Hans Bethe, nos EUA, e Carl Friedrich von Weizsaecker, na Alemanha, que a encontraram, separada e independentemente um do outro. Em 1938, descobriram a primeira reação que efetivamente transforma o hidrogênio em hélio e pode suprir o consumo energético das estrelas.

O processo é bastante complexo e pressupõe que, na estrela,

ao lado do hidrogênio haja ainda outros elementos como, por exemplo, o carbono. Os núcleos de carbono desempenham o papel de *catalisadores*, conforme são conhecidos na Química. O hidrogênio fica a eles agregado e dentro deles se formam os átomos de hélio. Eles repelem os átomos de hidrogênio unidos ao átomo de hélio, sem sofrer qualquer dano neste processo.

Conforme mostra a fig. 2-3, trata-se de um processo que evolui em círculo. Começamos com a parte superior do desenho, onde um núcleo de hidrogênio vai ao encontro de um núcleo de carbono, de massa atômica 12, cujo termo técnico é  $C^{12}$ . Graças ao Efeito de Túnel, ele consegue vencer o campo elétrico repelente do carbono e entrar em fusão com o núcleo. O novo núcleo é composto de 13 partículas pesadas. Com a adicional carga positiva do próton, aumenta a carga do primitivo núcleo de carbono e, por conseguinte, o número atômico. Destarte, foi obtido um núcleo do elemento nitrogênio, com o número de massa 13 e o termo técnico  $N^{13}$ . Este tipo de nitrogênio é radioativo e, depois de algum tempo, elimina duas partículas leves, um pósitron e um *neutrino*, partícula da qual ainda trataremos em outra parte. Com isso, o nitrogênio se transforma em carbono, com número de massa 13, ou seja, em  $C^{13}$ . O núcleo torna a apresentar carga igual à apresentada inicialmente pelo átomo do carbono, só que aumentou o seu número de massa. Temos agora um isótopo do núcleo primitivo. Quando este isótopo de carbono encontra com outro próton, torna a originar nitrogênio, com o número de massa 14, o  $N^{14}$ . Quando este novo átomo de nitrogênio depara com mais outro próton, transforma-se em  $O^{15}$ , ou seja, oxigênio, com o número de massa 15. Também este núcleo é radioativo e elimina um pósitron e um neutrino; neste processo transforma-se em  $N^{15}$ , ou seja, nitrogênio com o número de massa 15. Considerando que o processo começou com o carbono, número de massa 12 e chegou agora ao nitrogênio, número de massa 15, verificamos que, devido à constante agregação dos núcleos de hidrogênio, o átomo ficou sempre mais pesado. Quando, então, ao átomo de nitrogênio se junta mais outro próton, ficam eliminados dois átomos de hidrogênio e dois nêutrons que, em conjunto, formam um núcleo de hélio. Com isto, o nosso núcleo passa a metamorfosear-se no antigo núcleo de carbono e o círculo acaba de fechar-se.

**Fig. 3-2.** Transformação do hidrogênio em hélio, no ciclo do carbono. O esquema é o mesmo da fig. 3-1. As setas, em linha ondulada, indicam quando um átomo emite radiação;  $e^+$  = símbolo dos prótons;  $\nu$  = símbolo dos neutrinos.



Durante este processo foram eliminados, ao todo, quatro prótons e foi formado um núcleo de hélio. E no seu desenrolar é liberada a energia necessária para garantir o brilho das estrelas, por bilhões de anos. A matéria estelar é aquecida pelos diversos processos parciais do ciclo. Em parte, são os quanta de irradiação, gerados com as reações, que transmitem a energia ao gás estelar; em parte, são os pósitrons que logo se unem com os elétrons acelerados e se extinguem, de modo que os quanta de irradiação, assim gerados, contribuem para um aquecimento adicional da matéria estelar. Uma pequena parte da energia é levada pelos neutrinos. No Capítulo V trataremos do papel esquisito, por eles desempenhado.

Em 1967, Bethe recebeu o Prêmio Nobel de Física pela descoberta do ciclo do carbono, feita por ele e von Weizsaecker, em 1938. Naquela ocasião, a comissão Nobel parece ter-se esquecido de que eram dois os descobridores e, por conseguinte, o prêmio deveria ter ido para ambos os cientistas.

Sabemos que o ciclo pode evoluir tão-somente na presença dos elementos catalisadores, carbono, nitrogênio e oxigênio. A presença desses três elementos é desnecessária, pois basta estar presente um dos isótopos gerados no ciclo. Desde que uma reação começa, já estão sendo produzidos os catalisadores para as reações subseqüentes. Além do mais, as reações providenciam para que, no decurso de todo o ciclo, haja uma determinada proporção dos quanta desses isótopos elementares. Tal proporção depende da temperatura na qual o ciclo evolui. Hoje em dia, os astrofísicos têm condições de fazer uma razoável análise quantitativa da matéria cósmica, graças aos métodos de medição espectroscópica. Frequentemente, a proporção quantitativa dos isótopos  $C^{12}$ ,  $C^{13}$ ,  $N^{14}$  e  $N^{15}$  permite verificar se a matéria já tomou parte na fusão do hidrogênio, segundo o ciclo do carbono, no interior da estrela, bem como especificar a temperatura na qual a fusão ocorreu. Todavia, o hidrogênio transforma-se em hélio não somente no ciclo do carbono; há ainda um outro processo mais importante, pelo menos para o Sol, que foi descoberto um pouco mais tarde.

### A Cadeia Próton-Próton

O ciclo do carbono, conforme acaba de ser exposto, requer certa quantidade de carbono, oxigênio ou nitrogênio. Neste processo, os átomos desses elementos não se gastam; antes, por assim dizer, formam um invólucro protetor, dentro do

qual, no decorrer do tempo, os átomos de hidrogênio se transformam em átomos de hélio. Em 1938, Hans Bethe e Charles Critchfield provaram que, para tanto, o carbono, o oxigênio ou o nitrogênio são dispensáveis.

A fig. 3-3 ilustra o processo. Dois prótons vão ao encontro um do outro e se unem. Eles eliminam um pósitron e um nêutron; o núcleo restante é composto, tão-somente, de um próton e um nêutron. Este núcleo tem carga igual à do hidrogênio, mas o dobro do seu peso; é o hidrogênio pesado, o deutério. Quando um núcleo de hidrogênio depara com um núcleo de deutério, eles se unem para formar um átomo de hélio, composto de dois prótons e um nêutron. Este hélio ainda não é o hélio "legítimo", mas sim o isótopo mais leve, o  $He^3$ ; sua carga nuclear equivale à do hélio, mas seu número de massa é inferior. Quando então se encontram dois desses núcleos de hélio "leve", assim constituído, eles se fundem em um núcleo de hélio "legítimo", liberando nessa fusão dois núcleos de hidrogênio. Nessa cadeia, um total de quatro núcleos de hidrogênio tornou a compor um núcleo de hélio.

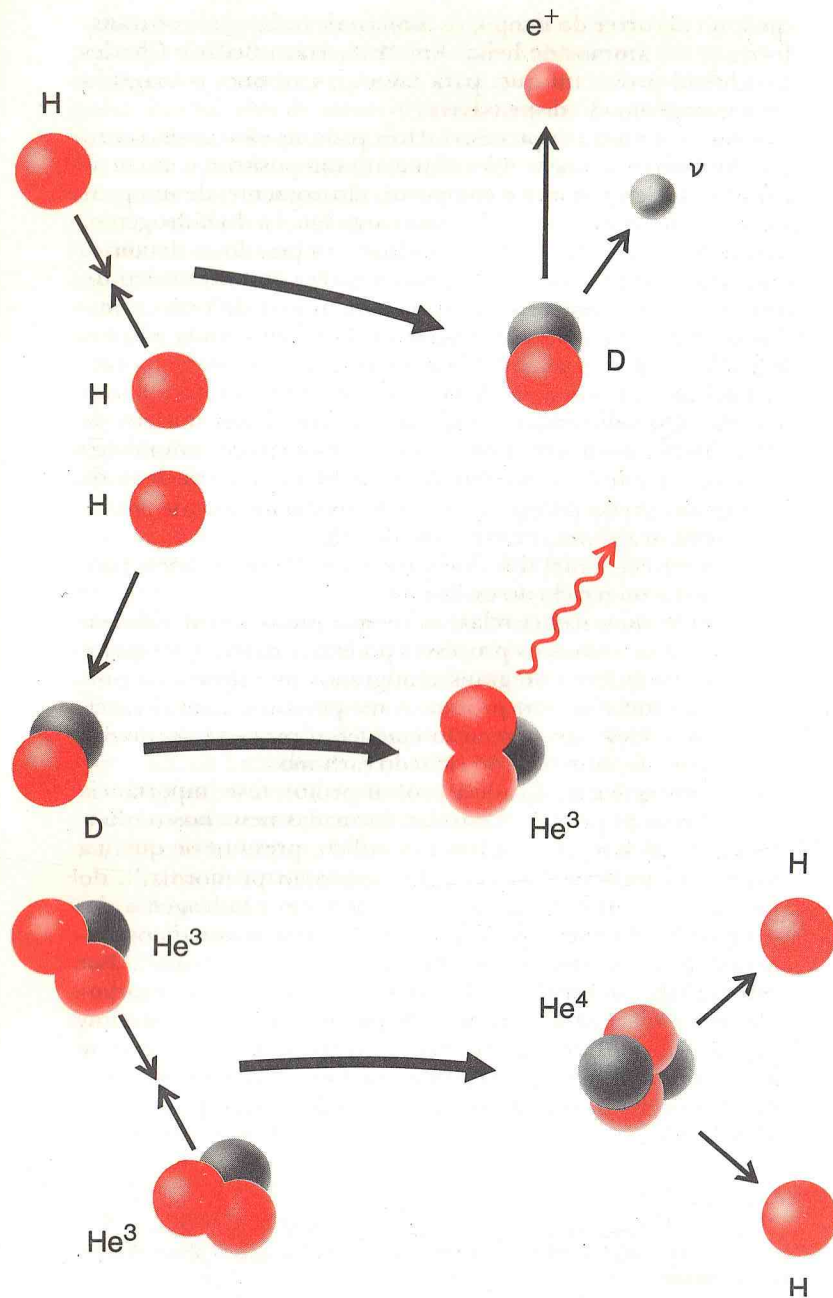
E nas estrelas, qual dos dois processos evolui, a cadeia próton-próton, ou o ciclo do carbono?

Supondo que, nas estrelas, as temperaturas sejam suficientemente altas, ambos os processos podem ocorrer. A temperaturas de 10 milhões de graus centígrados prevalecem os processos da cadeia próton-próton. A temperaturas consideravelmente mais elevadas, a geração energética processa-se, predominantemente, com base no ciclo do carbono.

Em conseqüência, a cadeia próton-próton teve importância especial com as primeiras estrelas, formadas neste nosso mundo. Na atual fase do progresso científico, presume-se que, na criação do universo, na hora da "explosão primordial", do "big-bang", foram originados tão-somente o hidrogênio e o hélio, de modo que as primeiras estrelas nem possuíam os elementos catalisadores, necessários ao ciclo do carbono\*. Por conseguinte, a subsistência de todas elas deveria ter sido garantida pela cadeia próton-próton. Somente em época posterior, quando, no interior das estrelas, o hélio chegou a formar-se do carbono — conforme veremos a seguir — as pósteras gerações de estrelas possuíram elementos catalisadores, para o ciclo do carbono.

\* O livro de Steven Weinberg, "Os Primeiros Três Minutos", Munique (Piper), 1977, trata da história da matéria, que deve ter formado a primeira geração de estrelas.





### Constituem-se os Elementos mais Pesados

O que se passa no interior de uma estrela, depois de todo o hidrogênio se ter transformado em hélio? Edwin Salpeter, atual catedrático da Universidade Cornell, nos EUA, demonstrou como o hélio pode transformar-se em carbono. A rigor, para tanto, bastam três núcleos de hélio; reunidos, dariam um núcleo de carbono com número de massa 12. Todavia, é totalmente improvável o encontro simultâneo de três núcleos de hélio. De preferência, a transformação processa-se em duas etapas, cujo esquema aparece na fig. 3-4, a saber: dois núcleos de hélio encontram-se e formam um átomo do elemento berílio, com o número de massa 8. Esta espécie de berílio é altamente radioativa, o núcleo de berílio, assim formado, fica coeso por um período de tempo incrivelmente breve. Após uns 10 milionésimos de 1 bilionésimo de segundo, decompõe-se nos dois núcleos de hélio, dos quais nasceu. No entanto, se, durante o brevíssimo espaço de sua vida, depara com um terceiro átomo de hélio, transforma-se em carbono bom, estável. Quase sempre, os núcleos de berílio se desintegram e raríssimas vezes um deles tem chance de salvar-se da desintegração certa, encontrando um átomo de hélio que por ele passe. Contudo, na matéria estelar, a temperatura de 100 milhões de graus centígrados, as transformações processadas são numerosas a ponto de a energia liberada servir de combustível à estrela.

E o que acontece em seguida? A temperaturas mais elevadas, átomos de carbono entram em fusão e se desintegram, de diversas maneiras, formando elementos tais como: magnésio, sódio, neônio e oxigênio. Átomos de oxigênio podem unir-se, originando enxofre e fósforo. Destarte, constituem-se núcleos atômicos sempre mais pesados e até seria lícito perguntar se, porventura, todos os elementos químicos não tenham surgido, no interior das estrelas, da fusão de hidrogênio com hélio. No Capítulo XI trataremos deste assunto.

Por ora, basta saber que reações nucleares podem processar-se no interior das estrelas e que, sob condições supostamente existentes nesse interior, sobretudo a fusão de hidrogênio com

Fig. 3-3. Cadeia próton-próton. O mesmo esquema da fig. 3-2. Outra transformação de hidrogênio em hélio. No desenho superior, dois núcleos de hidrogênio em hélio. No desenho superior, dois núcleos de hidrogênio reúnem-se para formar um núcleo de deutério. No meio, um núcleo de deutério reúne-se com um núcleo de hidrogênio para formar um isótopo de hélio. Embaixo, dois núcleos deste isótopo se fundem para um hélio normal de número de massa 4.

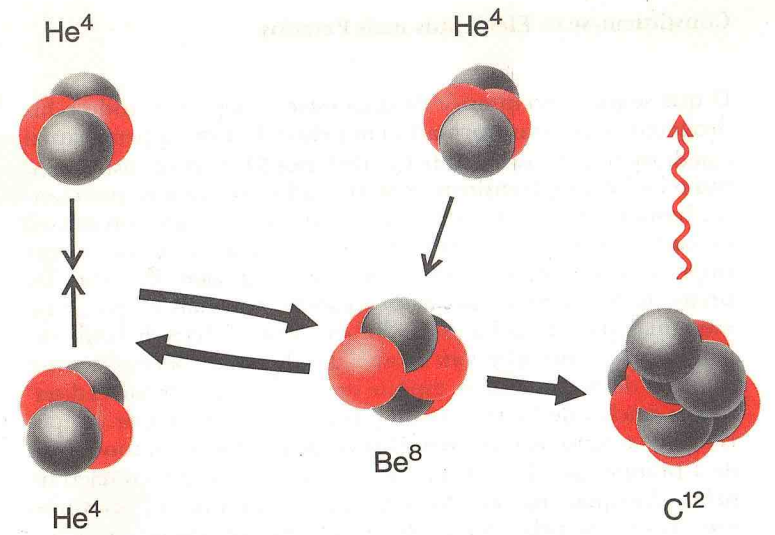


Fig. 3-4. Fusão de hélio em carbono. Dois núcleos de hélio se fundem para formar um núcleo de berílio, altamente radioativo, que logo se retransforma nos dois núcleos de hélio. Somente quando, durante sua breve vida, ele se depara com mais outro núcleo de hélio é que se transforma em carbono e, nesse processo, emite radiação.

hélio, elas podem garantir, por períodos prolongados, a enorme capacidade de irradiação dos astros.

No entanto, quais seriam as condições no interior das estrelas? Como saberemos, com certa precisão, quais as temperaturas reinantes, lá onde ninguém pode olhar e de onde não nos provém qualquer informação direta? A razão pela qual estamos razoavelmente bem informados a respeito do interior das estrelas, melhor do que do interior do globo terrestre, será exposta no próximo capítulo e nisto a moderna computação desempenha papel importante.